

DOI: 10.5846/stxb202107051785

付梦娣, 贾强, 任月恒, 周汉昌, 李俊生, 张渊媛, 白加德, 陈克林. 环渤海滨海湿地鸕鹚类水鸟多样性及其环境影响因子. 生态学报, 2021, 41(22): 8882-8891.

Fu M D, Jia Q, Ren Y H, Zhou H C, Li J S, Zhang Y Y, Bai J D, Chen K L. Diversity and environmental influencing factors of curlew waterbirds in coastal wetlands of the Bohai Rim. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 8882-8891.

## 环渤海滨海湿地鸕鹚类水鸟多样性及其环境影响因子

付梦娣<sup>1</sup>, 贾强<sup>2</sup>, 任月恒<sup>1</sup>, 周汉昌<sup>3</sup>, 李俊生<sup>1</sup>, 张渊媛<sup>4,5,\*</sup>, 白加德<sup>4,5</sup>, 陈克林<sup>6</sup>

1 中国环境科学研究院, 国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012

2 中咨集团生态技术研究所(北京)有限公司, 北京 100048

3 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

4 北京生物多样性保护研究中心, 北京 100076

5 北京麋鹿生态实验中心, 北京 100076

6 北京源河国际湿地文化交流中心, 北京 100029

**摘要:**环渤海湿地是水鸟南北迁徙的重要驿站,尤其对于该线路上的鸕鹚鸟类具有非常重要的意义。以环渤海地区 12 处典型滨海湿地为研究对象,于 2016—2020 年每年春季开展水鸟调查,明确了鸕鹚类水鸟群落组成及其时空变化,采用结构方程模型 (Structural Equation Modeling, SEM) 分析了鸕鹚类水鸟多样性与环境因子的响应关系,评估了各环境因子的影响强度。结果表明:(1)共记录到鸕鹚类水鸟 7 科 51 种,几乎全部为旅鸟。全球极危物种 1 种,濒危物种 3 种,近危物种 9 种。国家一级保护鸟类 2 种,国家二级保护鸟类 8 种。黑腹滨鹚 (*Calidris alpina*)、大滨鹚 (*Calidris tenuirostris*)、黑尾膝鹚 (*Limosa limosa*)、灰鹚 (*Pluvialis squatarola*)、斑尾膝鹚 (*Limosa lapponica*) 个体数量最多。(2)山东黄河三角洲、辽宁辽河口、天津北大港等河口湿地,水鸟种类多,单位面积水鸟数量较少。(3)河北沧州沿海、山东滨州贝壳堤岛及其周边区域为环渤海地区湿地集中区,水鸟种类较多。(4)综合影响强度为保护强度>食物>气候,建立自然保护地是保护水鸟多样性的最有效措施。(5)建议将河北南大港湿地和鸟类省级自然保护区提升至国家级,扩大滨州贝壳堤岛与湿地国家级自然保护区面积,对山东黄河三角洲、辽宁辽河口覆盖的各级各类自然保护地进行优化整合。研究结果能为环渤海地区鸕鹚类水鸟保护策略的制定提供相关依据。

**关键词:**鸕鹚类;物种多样性;环境影响因子;结构方程模型;环渤海地区

## Diversity and environmental influencing factors of curlew waterbirds in coastal wetlands of the Bohai Rim

FU Mengdi<sup>1</sup>, JIA Qiang<sup>2</sup>, REN Yueheng<sup>1</sup>, ZHOU Hanchang<sup>3</sup>, LI Junsheng<sup>1</sup>, ZHANG Yuanyuan<sup>4,5,\*</sup>, BAI Jiade<sup>4,5</sup>, CHEN Kelin<sup>6</sup>

1 Key Laboratory of Regional Eco-Process and Function Assessment and State Environment Protection, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2 China International Engineering Consulting Corporation, Ecological Technical Research Institute, Beijing 100048, China

3 Research Center for Eco-Environment Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

4 Beijing Biodiversity Conservation Research Center, Beijing 100076, China

5 Beijing Milu Ecological Research Center, Beijing 100076, China

6 International Wetlands & River, Beijing 100029, China

**Abstract:** The wetlands around the Bohai Sea are an important stop-over area for migration of the waterbirds along the East

基金项目:生态环境部生物多样性调查评估项目(2019HJ2096001006)

收稿日期:2021-07-05; 接收日期:2021-10-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyy@milupark.org.cn

Asia-Australasia Flyway, especially for the waders. Twelve typical coastal wetland sites around the Bohai Sea area were selected to survey the waterbirds in spring from 2016 to 2020. The data was collected about the wader waterfowl community composition and changes through time and space. The structural equation model was used to analyze the response relationships between the diversity of waders and the environmental factors, and to evaluate the impact intensity of each environmental factor. The results showed that: (1) a total of 51 species of 7 families of waders have been recorded, almost all of which were migrants. These included 1 critically endangered species, 3 endangered species, and 9 near threatened species at the global level. There were 2 species of the national first-level protected birds and 8 national second-level protected birds. Dunlin (*Calidris alpina*), Great knot (*Calidris tenuirostris*), Black-tailed godwit (*Limosa limosa*), Grey plover (*Pluvialis squatarola*), and Bar-tailed godwit (*Limosa lapponica*) had the largest number of individuals. (2) Estuary wetlands such as the Yellow River Delta in Shandong, Liaohe Estuary in Liaoning, and Beidagang in Tianjin had a large number of waterfowl species but a small number of waterfowl per unit area. (3) The coastal areas of Cangzhou, Hebei, the shell dike island of Binzhou, Shandong and its surrounding areas are wetland concentrated areas in the Bohai Rim area, where there are many species of waterbirds. (4) The comprehensive impact intensity was protection intensity > food > climate. The establishment of nature reserves is the most effective measure to protect the diversity of waterbirds. (5) It is recommended to upgrade the Hebei Nandagang Wetland and Bird Provincial Nature Reserve to the national level, expand the area of Binzhou Shell Beach Island and Wetland National Nature Reserve, and protect the various types of nature at all levels covering the Yellow River Delta in Shandong and the mouth of the Liao River in Liaoning. With the optimized integration, the research results can provide a relevant basis for the formulation of protection strategies for waders in the Bohai Rim.

**Key Words:** curlew waterbirds; diversity of species; environmental influencing factors; structural equation model; Bohai Rim area

随着经济社会的不断发展,人类活动对环境影响逐步增大,鸟类的物候学、行为模式、种群动态和分布范围也随之发生剧烈改变。鸟类对环境因子的响应机制是生态学研究中最基础和根本的问题之一<sup>[1]</sup>。20 世纪的研究显示,长距离迁徙鸟类的数量显著下降<sup>[2]</sup>,引起许多学者的关注,发现气候因子<sup>[3-5]</sup>、食物量<sup>[6]</sup>、捕食作用<sup>[7-8]</sup>、栖息地质量<sup>[9-11]</sup>等是影响迁徙鸟类数量及分布的重要因子。此外,不同时空下环境因子之间的相互作用,增加了水鸟和环境因子之间关系及作用机制研究的不确定性<sup>[12]</sup>。研究水鸟群落与环境因子之间的关系,对修复鸟类栖息地具有重要意义。

环渤海湿地是水鸟南北迁徙的重要驿站,是东亚-澳大利西亚水鸟迁徙路线的重要组成部分,尤其对于该线路上的鸻鹬类具有非常重要的意义<sup>[13]</sup>。环渤海地区作为我国经济发展的热点区域,滨海城市化及临海工业发展迅猛,黄河、海河、辽河汇入渤海,陆源污染物排海量大。近年来,大规模的滩涂围垦、填海造地和高密度的养殖,以及近岸海域环境污染,致使滨海湿地大面积减少、功能退化严重<sup>[14]</sup>,水鸟栖息地不断丧失。环渤海滨海湿地成为整条水鸟迁徙路线上最受胁的节点之一,水鸟保护形势严峻,特别是鸻鹬类水鸟,近年来种群数量下降趋势明显<sup>[15-16]</sup>。因此,开展鸻鹬类水鸟调查,明确鸻鹬类水鸟群落组成及其时空变化,研究水鸟多样性与环境因子的响应关系十分必要。本研究采用多元回归分析和结构方程模型 (Structural Equation Modeling, SEM) 对 2016—2020 年春季鸻鹬类水鸟多样性与气候、食物、保护强度等因子之间的关系进行分析,以期物种保护策略的制定提供必要的依据。

## 1 调查区概况

将环渤海的 12 个重要湿地作为本研究的调查区(表 1、图 1),总面积 4431 km<sup>2</sup>,涉及辽宁省大连、盘锦、锦西,河北省秦皇岛、唐山、沧州,天津,以及山东省滨州和东营。渤海主要入海河流有辽河、滦河、永定河、海河、

子牙河、黄河等。调查区涉及辽河、子牙河、黄河 3 处河口湿地。除辽东半岛和山东半岛属基岩海岸外,绝大部分为平原海岸,平原海岸湿地多为潮间带滩涂湿地和养殖池塘。广阔的滨海湿地孕育了极其丰富的生物区系,包括腔肠动物、软体动物、藻类等在内的物种数量达到 542 种,是各种水鸟的栖息、取食场所。调查区涉及了各级各类型自然保护地,包括自然保护区、海洋公园、海洋特别保护区、森林公园、地质公园等,总面积 3197 km<sup>2</sup>,覆盖了调查区的 72%。

表 1 环渤海滨海湿地水鸟调查点位

Table 1 Survey sites of waterbirds in coastal wetlands of Bohai Rim

序号 Code	调查地点 Survey site	面积/ Area km <sup>2</sup>	滨海湿 地类型 Coastal wetland type	涉及自然保护地名称 Name of the natural protected areas	自然保护地面积占比/% Proportion of natural protected areas
P1	辽宁蛇岛老铁山湿地	90	滩涂湿地	辽宁蛇岛老铁山国家级自然保护区	64
P2	辽宁营口-大连沿海湿地	226	养殖池塘	大连斑海豹国家级自然保护区	64
P3	辽宁辽河口湿地	800	河口湿地	辽宁辽河口国家级自然保护区、辽宁辽河口红海滩国家海洋公园、辽宁盘锦辽河口省级地质公园	77
P4	辽宁葫芦岛-锦州沿海湿地	210	养殖池塘	葫芦岛六股河入海口滨海湿地市级自然保护区	64
P5	河北北戴河湿地	300	滩涂湿地	海滨国家森林公园、北戴河国家级海洋公园	91
P6	河北乐亭沿海湿地	82	滩涂湿地	河北乐亭菩提岛省级自然保护区	77
P7	河北曹妃甸湿地	183	养殖池塘	曹妃甸湿地和鸟类省级自然保护区	91
P8	天津汉沽沿海湿地	360	滩涂湿地	天津古海岸与湿地国家级自然保护区	68
P9	天津北大港沿海湿地	440	河口湿地	天津北大港湿地省级自然保护区	77
P10	河北沧州沿海湿地	160	养殖池塘	河北南大港湿地和鸟类省级自然保护区	82
P11	山东滨州贝壳堤岛湿地	440	养殖池塘	滨州贝壳堤岛与湿地国家级自然保护区	100
P12	山东黄河三角洲湿地	1140	河口湿地	山东黄河三角洲国家级自然保护区、东营黄河口生态国家级海洋特别保护区、山东东营黄河三角洲国家地质公园、黄河口国家森林公园	91

P: 位点 Position

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据采集与处理

#### (1) 水鸟调查

环渤海湿地鸻鹬类水鸟调查于 2016—2020 年每年 4 月开展。依据《生物多样性观测技术导则 鸟类》(HJ 710.4—2014),采用样线法和样点法相结合的方法,通过双筒望远镜(Bushnell legend 10×42)、高倍单筒望远镜(Leica televid 32×77)对调查区域内的水鸟进行观测,记录物种、数量和位置。对于个体数量较少的鸟种直接计数,对个体数量较大或集群繁殖鸟种以每 10 只、20 只或 50 只为一个单位计数<sup>[17]</sup>。鸟类分类依据《中国鸟类分类与分布名录》(第三版)。鸟类保护等级依据《国家重点保护野生动物名录》(2021 年)、《世界自然保护联盟濒危物种红色名录》(2018 年)。

#### (2) 环境数据

气温、降水数据来源于调查区及其周边气象台站数据,采用 ANUSPLIN<sup>[18]</sup>对气象数据进行空间插值,空间分辨率 1 km,时间序列 2016—2020 年。保护地空间分布数据来源于国家林业和草原局。浮游动植物密度、大型底栖生物密度数据来源于国家海洋科学数据中心的黄渤海滨海带环境污染与生态状况综合调查结果,调查方法依据《海洋监测规范》(GB 17378—2007),其中浮游动物利用 I 型网采集样品;分析方法依据《近岸海洋生态健康评价指南》(HY/T 087—2005)。

### 2.2 研究方法

#### (1) 水鸟多样性测度

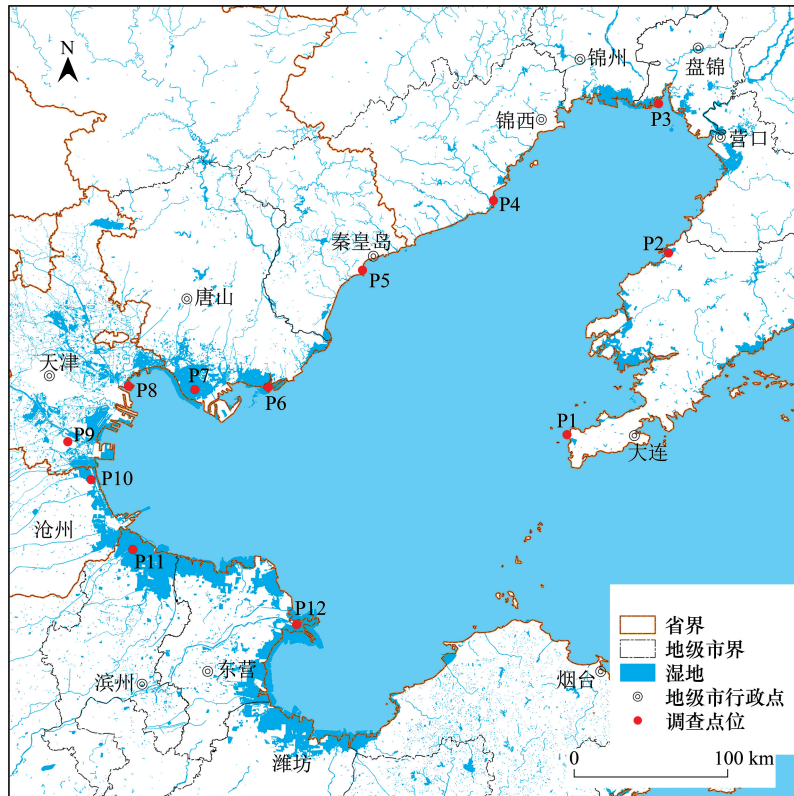


图 1 环渤海滨海湿地水鸟调查点位分布图

Fig.1 The spatial distribution of waterbirds survey points in coastal wetlands of Bohai Rim

P: 调查点位 Position

鸟类多样性能够表征鸟类群落的组成结构和栖息环境的良好程度<sup>[19]</sup>,对维持生态系统的稳定性具有重要作用。参考蒋志刚<sup>[20]</sup>、邵明勤<sup>[21]</sup>等人的研究,选取 Shannon-Wiener 多样性指数指征调查区鸕鹚类水鸟多样性,计算公式为:

$$H' = - \sum (P_i) (\ln P_i)$$

式中,  $H'$  为 Shannon-Wiener 多样性指数,  $P_i$  为  $i$  物种的个体在所有物种个体总数的比例。

(2) 结构方程模型建立

结构方程模型 (Structural Equation Modeling, SEM) 是基于变量的协方差矩阵分析变量之间关系的一种方法,主要用于对复杂的多变量数据进行处理<sup>[22]</sup>。该模型由测量方程和结构方程两部分组成,测量方程用来描述潜变量和显变量之间的关系,结构方程是用来描述潜变量与潜变量之间的关系<sup>[23]</sup>。计算公式为:

$$x = \Lambda_x \xi + \delta \tag{1}$$

$$y = \Lambda_y \eta + \varepsilon \tag{2}$$

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta \tag{3}$$

式中,方程(1)和方程(2)为测量方程,方程(3)为结构方程。 $x$  是外生可测变量向量; $\xi$  是外生潜变量向量; $y$  是内生可测变量向量; $\eta$  是内生潜变量向量; $\Lambda_x$  为外生可测变量与外生潜变量之间的关系,是外生可测变量在外生潜变量上的因子负荷矩阵; $\Lambda_y$  为内生可测变量与内生潜变量之间的关系,是内生可测变量在内生潜变量上的因子负荷矩阵; $B$  是内生潜变量的关系阵; $\Gamma$  则表示外生潜变量对于内生潜变量的影响; $\delta$  和  $\varepsilon$  为测量方程的误差项; $\zeta$  为结构方程的误差项。

水鸟对停歇点食物资源需求不同于繁殖地和越冬地,食物资源的丰富度是影响水鸟对停歇地的选择的重

要因素<sup>[24-25]</sup>。气候条件变化对湿地水鸟的影响包括气候变暖导致迁徙时间和迁徙距离发生变化,以及改变停歇点湿地食物和栖息资源的提供等<sup>[26]</sup>。调查区已建立数量众多、类型丰富、功能多样的各级各类自然保护地,在保护鸟类多样性、改善生态环境质量方面发挥了一定作用<sup>[27-28]</sup>。调查区为潮间带滩涂湿地、养殖池塘和河口湿地,调查时间内水位、盐度、植被盖度基本稳定,栖息地质量变化小。基于以上考虑和数据可获得性,建立环渤海滨海湿地鸕鹚类水鸟多样性与环境因子响应关系的概念模型(图2)。模型包括2个潜变量:气候和食物,7个可测变量:年均温度、年均降雨、浮游植物密度、浮游动物密度、大型底栖生物密度、鸕鹚类水鸟多样性、保护强度,e1—e8是残差变量。其中保护强度指各调查区覆盖的自然保护地面积比例(表1)。假设气候、食物、保护强度对鸕鹚类鸟类多样性有正向影响;气候、保护强度对食物有正向影响。运用 Amos24.0 进行结构方程模型的分析。采用绝对拟合指数、相对拟合指数和精简指数三类拟合指数,包括  $\chi^2/df$ 、GFI、RMSEA、NFI、TLI、CFI、IFI、AIC 和 ECVI,指征验证结果是否具有统计学意义。

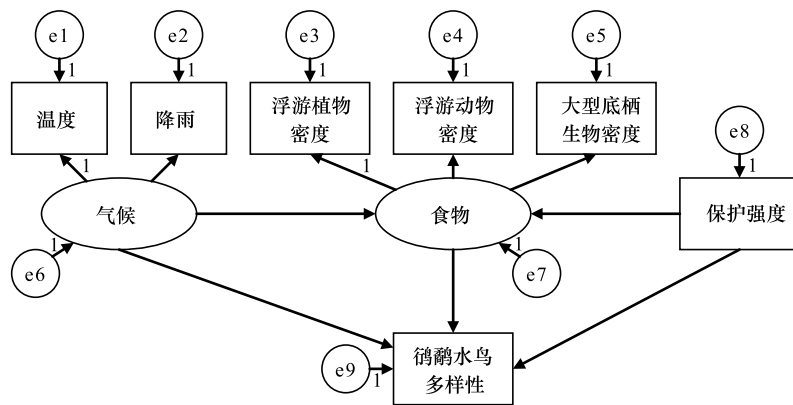


图2 环渤海滨海湿地鸕鹚类水鸟多样性与环境因子响应关系概念模型

Fig. 2 Conceptual model for the relationship between diversity and environmental factors of curlew waterbird in coastal wetlands of Bohai Rim

### 3 结果

#### 3.1 鸕鹚类群落变化

##### (1) 群落组成

2016—2020年的水鸟调查共记录鸕鹚类7科51种(表2),其中旅鸟50种。全球极危物种1种,濒危物种3种,近危物种9种。国家一级保护鸟类2种,国家二级保护鸟类8种。年最大种群个体数量较多的水鸟有黑腹滨鸕(125089只)、大滨鸕(112370只)、黑尾塍鸕(49306只)、灰鸕(47449只)、斑尾塍鸕(43267只)、白腰杓鸕(42487只)、环颈鸕(40172只)、红腹滨鸕(33167只)。经计算,斑尾塍鸕(近危物种)、白腰杓鸕(近危物种)、大滨鸕(濒危物种)、环颈鸕的大部分迁徙种群在环渤海的滨海湿地中停歇<sup>[29]</sup>。

##### (2) 群落时空变化

2016—2020年,调查区鸕鹚类水鸟种类较多的湿地依次为山东黄河三角洲湿地、河北沧州沿海湿地(P10)、辽宁辽河口湿地(P3)、天津北大港沿海湿地(P9)、山东滨州贝壳堤岛湿地(P11)(图3)。其中,山东黄河三角洲湿地(P12)、辽宁辽河口湿地(P3)、天津北大港沿海湿地(P9)均为河口湿地,占调查区总面积的53.71%,单位面积鸕鹚类水鸟数量较少(图4)。河北沧州沿海、山东滨州贝壳堤岛及其周边区域湿地集中连片,为环渤海地区湿地集中区,鸕鹚类水鸟种类较多。

辽宁蛇岛老铁山湿地(P1)为基岩海岸,海拔最高(87 m),森林覆盖度35%,鸕鹚类水鸟种类最少,但单位面积鸕鹚类水鸟数量较多。河北曹妃甸湿地(P7)紧邻河北省唐山市曹妃甸区,人类活动影响最大,鸕鹚类水鸟种类、数量年际变化均最大。由于逐年的填海造地,天津汉沽沿海湿地(P8)鸕鹚类水鸟种类年际变化

大,河北乐亭沿海湿地(P6)鹤鹬类水鸟数量年际变化大<sup>[30]</sup>。辽宁营口-大连沿海湿地(P2)、辽宁葫芦岛-锦州沿海湿地(P4)、河北北戴河湿地(P5)面积较小,多为养殖池塘,鹤鹬类水鸟种类、数量均不高。

表 2 环渤海滨海湿地鹤鹬类水鸟名录

Table2 Curlew waterbird list in coastal wetlands of Bohai Rim

目/科/种 Order/Family/Species	居留类型 Residence type	年最大种群个体数量/只 Maximum number of individuals annually	国家保护级别 National protection category	IUCN 红色名录等级 IUCN redlist
鹤形目 Charadriiformes				
(1) 彩鹬科 Rostratulidae				
1. 彩鹬 <i>Rostratula benghalensis</i>	S/P	1		
(2) 蛎鹬科 Haematopodidae				
2. 蛎鹬 <i>Haematopus ostralegus</i>	P	1281		NT
(3) 鸕嘴鹬科 Ibisornithidae				
3. 鸕嘴鹬 <i>Ibisornis sinensis</i>	R	14590	II	
(4) 反嘴鹬科 Recurvirostridae				
4. 黑翅长脚鹬 <i>Himantopus himantopus</i>	S/P	16025		
5. 反嘴鹬 <i>Recurvirostra avosetta</i>	S/P	9116		
(5) 燕鹬科 Glareolidae				
6. 普通燕鹬 <i>Glareola maldivarum</i>	S/P	73		
(6) 鹬科 Charadriidae				
7. 凤头麦鸡 <i>Vanellus vanellus</i>	P	163		NT
8. 灰头麦鸡 <i>Vanellus cinereus</i>	S/P	368		
9. 金鹬 <i>Pluvialis fulva</i>	P	18406		
10. 灰鹬 <i>Pluvialis squatarola</i>	P	47449		
11. 长嘴剑鹬 <i>Charadrius placidus</i>	S/P	121		
12. 金眶鹬 <i>Charadrius dubius</i>	S/P	1739		
13. 环颈鹬 <i>Charadrius alexandrinus</i>	S/P	40172		
14. 蒙古沙鹬 <i>Charadrius mongolus</i>	P	1699		
15. 铁嘴沙鹬 <i>Charadrius leschenaultii</i>	P	506		
(7) 鹬科 Scolopacidae				
16. 黑尾塍鹬 <i>Limosa limosa</i>	P	49306		NT
17. 斑尾塍鹬 <i>Limosa lapponica</i>	P	43267		NT
18. 小杓鹬 <i>Numenius minutus</i>	P	1383	II	
19. 中杓鹬 <i>Numenius phaeopus</i>	P	13975		
20. 白腰杓鹬 <i>Numenius arquata</i>	P	42487	II	NT
21. 大杓鹬 <i>Numenius madagascariensis</i>	P	25973	II	EN
22. 小青脚鹬 <i>Tringa guttifer</i>	P	182	I	EN
23. 青脚鹬 <i>Tringa nebularia</i>	P	6779		
24. 红脚鹬 <i>Tringa totanus</i>	P	516		
25. 鹤鹬 <i>Tringa erythropus</i>	P	972		
26. 白腰草鹬 <i>Tringa ochropus</i>	P/W	2620		
27. 林鹬 <i>Tringa glareola</i>	P	933		
28. 翘嘴鹬 <i>Xenus cinereus</i>	P	1044		
29. 勺嘴鹬 <i>Calidris pygmeus</i>	P	1	I	CR
30. 泽鹬 <i>Tringa stagnatilis</i>	P	11398		
31. 矶鹬 <i>Actitis hypoleucos</i>	P	1123		
32. 翻石鹬 <i>Arenaria interpres</i>	P	212	II	
33. 丘鹬 <i>Scolopax rusticola</i>	P	5		

续表

目/科/种 Order/Family/Species	居留类型 Residence type	年最大种群个体数量/只 Maximum number of individuals annually	国家保护级别 National protection category	IUCN 红色名录等级 IUCN redlist
34.扇尾沙锥 <i>Gallinago gallinago</i>	P	67		
35.针尾沙锥 <i>Gallinago stenura</i>	P	8		
36.孤沙锥 <i>Gallinago solitaria</i>	P	3		
37.大沙锥 <i>Gallinago megala</i>	P	8		
38.三趾滨鹬 <i>Calidris alba</i>	P	916		
39.红腹滨鹬 <i>Calidris canutus</i>	P	33167		NT
40.红颈滨鹬 <i>Calidris ruficollis</i>	P	14457		NT
41.大滨鹬 <i>Calidris tenuirostris</i>	P	112370	II	EN
42.小滨鹬 <i>Calidris minuta</i>	P	13		
43.青脚滨鹬 <i>Calidris temminckii</i>	P	5215		
44.长趾滨鹬 <i>Calidris subminuta</i>	P	20		
45.尖尾滨鹬 <i>Calidris acuminata</i>	P	2443		
46.黑腹滨鹬 <i>Calidris alpina</i>	P	125089		
47.弯嘴滨鹬 <i>Calidris ferruginea</i>	P	6691		NT
48.阔嘴鹬 <i>Calidris falcinellus</i>	P	620	II	
49.流苏鹬 <i>Calidris pugnax</i>	P	43		
50.半蹼鹬 <i>Limnodromus semipalmatus</i>	P	264	II	NT
51.红颈瓣蹼鹬 <i>Phalaropus lobatus</i>	P	1856		

R: 留鸟, S: 夏候鸟, W: 冬候鸟, P: 旅鸟; I: 国家 I 级保护动物, II: 国家 II 级保护动物; CR: 极危 Critically Endangered, EN: 濒危 Endangered, NT: 近危 Near Threatened

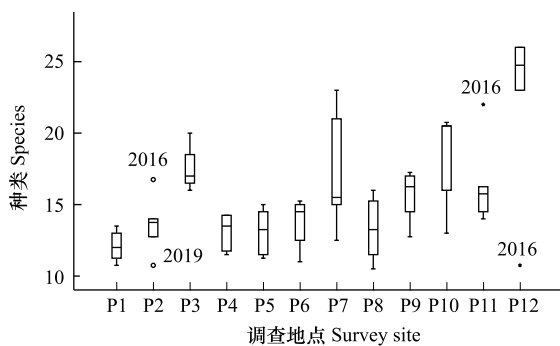


图 3 环渤海滨海湿地鹤鹬类水鸟种类统计图

Fig. 3 Statistical map of the species of curlew waterbirds in coastal wetlands of Bohai Rim

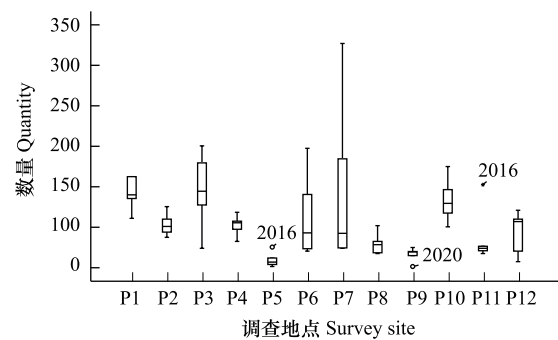


图 4 环渤海滨海湿地单位面积鹤鹬类水鸟数量统计图

Fig. 4 Statistical map of quantity per unit area of curlew waterbirds in coastal wetlands of Bohai Rim

各调查区的水鸟多样性差异明显。2016—2020 年, 鹤鹬类水鸟多样性最高的区域为环渤海西南部、西部地区, 位列前四名的湿地依次为山东黄河三角洲湿地 (P12)、河北沧州沿海湿地 (P10)、山东滨州贝壳堤岛湿地 (P11)、天津北大港沿海湿地 (P9) (图 5)。辽宁蛇岛老铁山湿地 (P1)、河北北戴河湿地 (P5)、辽宁葫芦岛-锦州沿海湿地 (P4) 的鹤鹬类水鸟多样性最低。河北北戴河湿地 (P5)、天津汉沽沿海湿地 (P8) 鹤鹬类水鸟种类年际变化大, 导致多样性年际变化最大。辽宁营口-大连沿海湿地 (P2)、辽宁辽河口湿地 (P3)、河北乐亭沿海湿地 (P6)、河北曹妃甸湿地 (P7) 鹤鹬类水鸟多样性年均稳定在 2 左右。

### 3.2 SEM 模型拟合指数分析

经过反复拟合、评价、修正、再评价后得到了标准化系数修正模型 (图 6), 拟合指数分析结果如表 3 所示,

拟合指数总体表现较好,均达到拟合指数要求,认为从统计学角度经过修正后得到的环渤海滨海湿地鸕鹚类水鸟多样性与环境因子响应关系模型比较合理。潜变量及可测变量之间总得影响效果见图 6。

### 3.3 SEM 模型计算结果分析

2016—2020 年辽宁辽河口湿地的多年平均气温最低,为 10.59℃;辽宁蛇岛老铁山湿地的多年平均降水量最低,为 451.2 mm,其次为天津北大港沿海湿地、河北沧州沿海湿地、山东滨州贝壳堤岛湿地;其他湿地的年均温度及降雨量,随所处纬度的增高而增高。温度、降雨两个可测变量对气候潜变量的影响路径系数分别为 1.18 和-0.34。气候对鸕鹚类水鸟多样性的直接影响为 0.33,间接影响为-0.26。辽宁蛇岛老铁山湿地的温度、降雨量均较低,水鸟多样性最低。

浮游植物对环境变化反应敏感,其动态可以良好地指示气候变化,受温度的影响为 0.31,对鸕鹚类水鸟多样性的间接影响为 0.34。浮游动物具有连接初级生产者和高级营养级的作用,对鸕鹚类水鸟多样性的间接影响为 0.26。大型底栖生物对鸕鹚类水鸟多样性的间接影响为 0.38。食物对鸕鹚类水鸟多样性的直接影响为 0.44。河北北戴河湿地及周边海水富营养化严重,浮游植物密度(8714.67 万个/ $m^3$ )过高,浮游动物密度(528 个/ $m^3$ )、生物量过高,底栖动物密度(91.47 个/ $m^3$ )、生物量过低,水鸟多样性低。

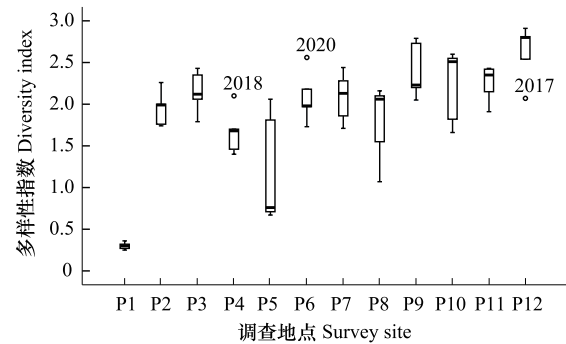


图 5 环渤海滨海湿地鸕鹚类水鸟多样性统计图

Fig. 5 Statistical map of the diversity of curlew waterbirds in coastal wetlands of Bohai Rim

表 3 模拟拟合指数表

Table 3 Fitting index of model

指数名称 Indices name	参考标准 Evaluation criterion	评价结果 Results
绝对拟合指数 Absolute fitting index	$\chi^2/df$	<3
	GFI	>0.9, 越近 1 越好
	RMSEA	<0.05
相对拟合指数 Relative fit index	NFI	>0.9, 越近 1 越好
	TLI	0.979
	CFI	0.998
精简指数 Compact index	IFI	0.998
	AIC	越小越好
	ECVI	越小越好

$\chi^2/df$ : 卡方自由度比, GFI: 拟合优度指数 Goodness of Fit Index, RMSEA: 近似误差均方根 Root Mean Square Error of Approximation, NFI: 赋范拟合指数 Normed Fit Index, TLI: 塔克-刘易斯指数 Tucker-Lewis Index, CFI: 比较拟合指数 Comparative Fit Index, IFI: 增量拟合指数 Incremental Fit Index, AIC: 讯息效标系数 Akaike Information Criterion, ECVI: 预期交叉验证指数 Expected Cross-Validation Index

保护强度与食物的相关系数为 0.68,对鸕鹚类水鸟多样性的间接影响为 0.3、直接影响为 0.47。调查区覆盖 18 处自然保护地,其中自然保护区 11 处、森林公园 2 处、地质公园 2 处、海洋公园 2 处、海洋特别保护区 1 处。国家级、省级、市级自然保护地分别 12 处、5 处、1 处。各级各类自然保护地的建设管理能有效保护鸟类多样性。

## 4 讨论

鸟类多样性是潜变量与潜变量、潜变量与可测变量、可测变量与可测变量相互作用的结果,结构方程模型的建立可以定量描述这一复杂关系。本研究根据环渤海滨海湿地鸕鹚类水鸟群落组成时空变化特征,探索性



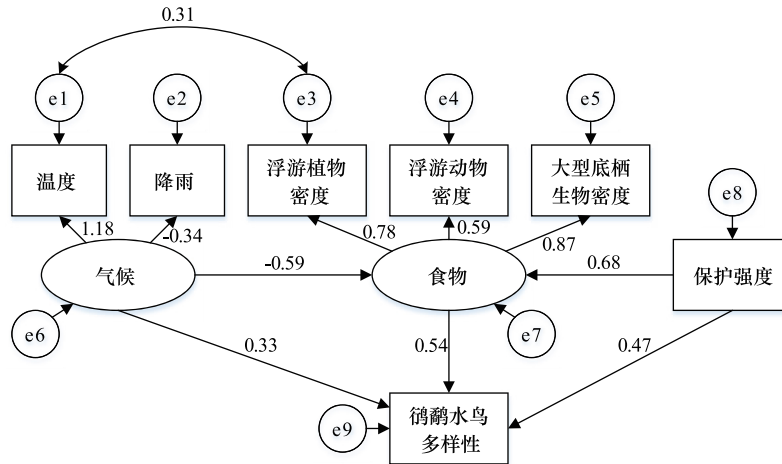


图 6 鸻鹬类水鸟多样性与环境因子响应关系修正模型

Fig.6 Correction model for the relationship between diversity and environmental factors of curlew waterbirds

地将结构方程模型引入了水鸟多样性与环境因子响应关系研究,定量分析环境因子的影响力度,运算、分析结果表明:气候、食物、保护强度对鸻鹬类水鸟多样性具有直接影响作用,其中食物的直接影响力最大;保护强度不仅对鸻鹬类水鸟多样性存在直接影响,此外通过食物对其产生间接影响,合计影响力最大。今后需要强化自然保护地建设管理在维护提升鸟类物种多样性过程中的作用。建议:①调整河北南大港湿地和鸟类省级自然保护区保护等级,提升至国家级;②将滨州贝壳堤岛与湿地国家级自然保护区周边集中连片湿地纳入保护区,扩大保护区范围;③对山东黄河三角洲、辽宁辽河口覆盖的各级各类自然保护地进行优化整合,确保水鸟多样性集中分布区及其所承载的景观、地质地貌得到有效保护。

此外,SEM 模型拟合结果是由现状可测量变量所支撑的,是反映研究时段内的各变量响应关系,对于其未来的发展趋势尚难以定论。对于不同时期、不同尺度和不同条件下的水鸟多样性与环境因子响应关系则需要补充完善相关变量来拟合,从而使结论更具科学性和准确性。

## 5 结论

环渤海地区 12 个典型滨海湿地,共记录鸻鹬类水鸟 7 科 51 种,其中旅鸟 50 种。全球极危物种 1 种,濒危物种 3 种,近危物种 9 种。国家一级保护鸟类 2 种,国家二级保护鸟类 8 种。黑腹滨鹬、大滨鹬、黑尾塍鹬、灰鹬、斑尾塍鹬、白腰杓鹬、环颈鹬、红腹滨鹬个体数量最多。斑尾塍鹬(近危物种)、白腰杓鹬(近危物种)、大滨鹬(濒危物种)、环颈鹬的大部分迁徙种群在环渤海的滨海湿地中停歇。山东黄河三角洲、辽宁辽河口、天津北大港等河口湿地,水鸟种类多,单位面积水鸟数量较少。河北沧州沿海、山东滨州贝壳堤岛及其周边区域为环渤海地区湿地集中区,水鸟种类较多。环境因子的影响强度由大到小依次为保护强度、食物、气候。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Fang J Y, Wang Z H, Zhao S Q, Li Y K, Tang Z Y, Yu D, Ni L Y, Liu H Z, Xie P, Da L J, Li Z Q, Zheng C Y. Biodiversity changes in the lakes of the Central Yangtze. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, 4(7): 369-377.
- [ 2 ] Baillie S R, Peach W J. Population limitation in Palaearctic-African migrant passerines. *Ibis*, 1992, 134(S1): 120-132.
- [ 3 ] Sillert T S, Holmes R T, Sherry T W. Impacts of a global climate cycle on population dynamics of a migratory songbird. *Science*, 2000, 288(5473): 2040-2042.
- [ 4 ] Studds C E, Deluca W V, Baker M E, King R S, Marra P P. Land cover and rainfall interact to shape waterbird community composition. *PLoS One*, 2012, 7(4): e35969.
- [ 5 ] Zhang Y M, Tan W Z, Zeng Q, Tian H T, Jia Y F, Lei G C, Wen L. Lake productivity and waterbird functional diversity across geographic and

- environmental gradients in temperate China. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(20): 11237-11250.
- [ 6 ] Rodenhouse N L, Holmes R T. Results of experimental and natural food reductions for breeding black-throated blue warblers. *Ecology*, 1992, 73(1): 357-372.
- [ 7 ] Donovan T M, Jones P W, Annand E M, Thompson III F R. Variation in local-scale edge effects: mechanisms and landscape context. *Ecology*, 1997, 78(7): 2064-2075.
- [ 8 ] Francesiaz C, Yohannes E, Besnard A, Sadoul N, Blanchon T, Béchet A. Foraging niche shift maintains breeding parameters of a colonial waterbird during range expansion. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(4): 1988-1997.
- [ 9 ] Stutchbury B J. Competition for winter territories in a neotropical migrant: the role of age, sex and color. *The Auk*, 1994, 111(1): 63-69.
- [ 10 ] Guan L, Lei J L, Zuo A J, Zhang H, Lei G C, Wen L. Optimizing the timing of water level recession for conservation of wintering geese in Dongting Lake, China. *Ecological Engineering*, 2016, 88: 90-98.
- [ 11 ] Almeida B A, Sebastián-González E, dos Anjos L, Green A J. Comparing the diversity and composition of waterbird functional traits between natural, restored, and artificial wetlands. *Freshwater Biology*, 2020, 65(12): 2196-2210.
- [ 12 ] Kleijn D, Cherkaoui I, Goedhart P W, van der Hout J, Lammertsma D. Waterbirds increase more rapidly in ramsar-designated wetlands than in unprotected wetlands. *Journal of Applied Ecology*, 2014, 51(2): 289-298.
- [ 13 ] 陈克林, 杨秀芝, 吕咏. 鸕鹚类鸟东亚-澳大利西亚迁飞路线上的重要驿站: 黄渤海湿地. *湿地科学*, 2015, 13(1): 1-6.
- [ 14 ] 肖洋, 张路, 张丽云, 肖焱, 郑华, 欧阳志云. 渤海沿岸湿地生物多样性变化特征. *生态学报*, 2018, 38(3): 909-916.
- [ 15 ] 陈莹, 谭坤, 马志军. 黄渤海湿地面积变化及其对鸕鹚类的影响//第十二届全国鸟类学术研讨会暨第十届海峡两岸鸟类学术研讨会论文集摘要集. 杭州: 浙江省科学技术协会, 2013: 84-84.
- [ 16 ] 赵宁, 夏少霞, 于秀波, 段后浪, 李瑾璞, 陈亚恒. 基于 MaxEnt 模型的渤海湾沿岸鸕鹚类栖息地适宜性评价. *生态学杂志*, 2020, 39(1): 194-205.
- [ 17 ] 陈克林, 吕咏, 王琳, 陈顾, 吕宪国, 姜明. 中国环绕黄海和渤海的湿地春季水鸟多样性及其分布. *湿地科学*, 2019, 17(2): 137-145.
- [ 18 ] Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, Jones P G, Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(15): 1965-1978.
- [ 19 ] 冯威, 赵成章, 岳冉, 张翔, 金建鑫. 张掖国家湿地公园冬春季鸟类群落多样性和相似性分析. *生态学杂志*, 2017, 36(8): 2224-2231.
- [ 20 ] 蒋志刚, 纪力强. 鸟兽物种多样性测度的  $G-F$  指数方法. *生物多样性*, 1999, 7(3): 220-225.
- [ 21 ] 邵明勤, 曾宾宾, 徐贤柱, 尚小龙, 戴年华. 鄱阳湖流域非繁殖期鸟类多样性. *生态学报*, 2013, 33(1): 140-149.
- [ 22 ] 李慧, 汪景宽, 裴久渤, 李双异. 基于结构方程模型的东北地区主要旱地土壤有机碳平衡关系研究. *生态学报*, 2015, 35(2): 517-525.
- [ 23 ] 成思敏, 王继军, 郭满才, 李茂森, 乔梅, 赵晓翠. 基于结构方程模型的陕北退耕区农业产业-资源系统耦合机制分析——以吴起县为例. *自然资源学报*, 2018, 33(7): 1165-1178.
- [ 24 ] Tidwell P R, Webb E B, Vrtiska M P, Bishop A A. Diets and food selection of female mallards and blue-winged teal during spring migration. *Journal of Fish and Wildlife Management*, 2013, 4(1): 63-74.
- [ 25 ] 张强, 马克明, 李金亚, 张育新. 不同尺度下停歇点湿地对迁徙水鸟的影响研究综述. *生态学报*, 2017, 37(8): 2520-2529.
- [ 26 ] Traill L W, Bradshaw C J A, Brook B W. Satellite telemetry and seasonal movements of Magpie Geese (*Anseranas semipalmata*) in tropical northern Australia. *Emu - Austral Ornithology*, 2010, 110(2): 160-164.
- [ 27 ] 陈龙, 张美玲, 李凤丽, 于文颖. 2017 年春季辽河口湿地鸟类群落结构和多样性. *湿地科学*, 2019, 17(2): 146-151.
- [ 28 ] 柴子文, 雷维蟠, 莫训强, 阙品甲, 尚成海, 阳积文, 张正旺. 天津市北大港湿地自然保护区的鸟类多样性. *湿地科学*, 2020, 18(6): 667-678.
- [ 29 ] 张孚允, 杨若莉. 中国鸟类迁徙研究. 北京: 中国林业出版社, 1997: 30-33.
- [ 30 ] 颜凤, 李宁, 杨文, 乔亚军, 安树青. 围填海对湿地水鸟种群、行为和栖息地的影响. *生态学杂志*, 2017, 36(7): 2045-2051.